

⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑪ DE 3142684 A1

⑳ Aktenzeichen:  
㉑ Anmeldetag:  
㉒ Offenlegungstag:

P 31 42 684.0  
28. 10. 81  
5. 5. 83

⑤ Int. Cl. 3:  
H 01 L 41/08  
H 01 L 41/18  
G 01 D 5/14  
B 06 B 1/06  
C 04 B 35/49  
H 01 H 57/00

㉓ Anmelder:  
Philips Patentverwaltung GmbH, 2000 Hamburg, DE

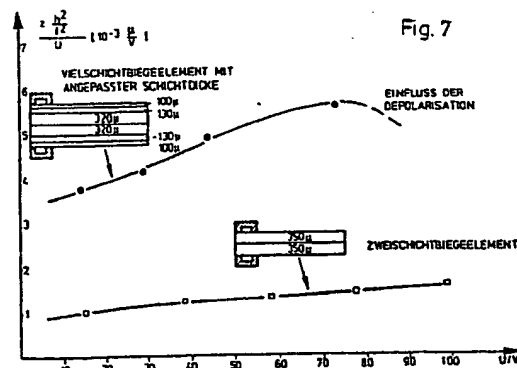
㉔ Erfinder:  
Schnell, Axel, Dr., 5100 Aachen, DE

Behörden Eigentum

⑤4 »Elektromechanischer Wandler«

Die Empfindlichkeit von elektromechanischen Wandlern aus piezoelektrischem oder elektrostriktivem Material in Multimorph-Konfiguration kann entscheidend verbessert werden, wenn die Auswirkungen der inneren mechanischen Scherspannungen zwischen den einzelnen Schichten des Wandlerkörpers auf ein Mindestmaß reduziert werden, indem die Schichtdicke der einzelnen Schichten des Wandlerkörpers nicht konstant gehalten ist, sondern so angepaßt wird, daß die mittlere Dehnung pro Schicht gerade der natürlichen Dehnung bei Biegung entspricht, gemäß  $d_n = (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \cdot d_1$ , wobei  $n$  den Laufindex der Schichten, also die  $n$ -te Schicht bezeichnet und  $d_1$  die Schichtdicke der dicksten Schicht bedeutet.

(31 42 684)



DE 3142684 A1

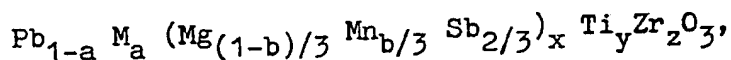
DE 3142684 A1

Patentansprüche:

1. Elektromechanischer Wandler mit  $2n$ , aus einem piezoelektrischen oder elektrostriktiven Material bestehenden, einen Stapel bildenden, streifenförmigen, an ihren Hauptflächen mit Elektroden bedeckten Schichten, von denen jeweils  $n$  eine Stapelhälfte bildende Schichten beiderseits der Mitte des Stapels liegen, und mit Einrichtungen zum Zuführen von Spannungen an die Elektroden zur Bildung von senkrecht zu den Hauptflächen der Schichten stehenden elektrischen Feldern, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke der Schichten jeder Stapelhälfte von der Mitte des Stapels her nach außen hin abnimmt und daß die Schichten beider Stapelhälften, die in gleichem Abstand zur Mitte des Stapels liegen, gleiche Dicke aufweisen.
2. Elektromechanischer Wandler nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtdicke der Schicht  $d_n$ , ausgehend von der Anzahl  $n$  der Schichten in jeweils einer Stapelhälfte, gegeben ist durch:
- $$d_n = (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \cdot d_1$$
, wobei  $d_1$  die Schichtdicke der dicksten Schicht ist.
3. Elektromechanischer Wandler nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der aus den streifenförmigen Schichten gebildete Stapel an seinem einen Ende in einer Halterung fixiert ist und daß die freie Länge des Stapels senkrecht zu seinen Hauptflächen auslenkbar ist.
4. Elektromechanischer Wandler nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Verhältnis von freier Länge zur Gesamtdicke des Stapels  $5 : 1$  bis  $100 : 1$  beträgt.

5. Elektromechanischer Wandler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die streifenförmigen Schichten aus einem Material bestehen, dessen Wert für die piezoelektrische Ladungskonstante  $d_{31}$  mindestens  $150 \cdot 10^{-12}$  m/V beträgt.

6. Elektromechanischer Wandler nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die streifenförmigen Schichten aus einer ferroelektrischen Mischkristallkeramik bestehen auf der Basis von:



15 worin bedeuten:

M = mindestens ein Erdalkalimetall wie Ca, Sr, Ba

$$0 \leq a \leq 0,15$$

$$0 \leq b \leq 0,20$$

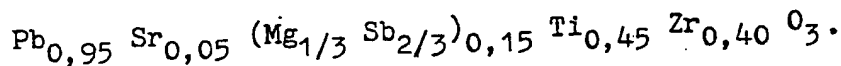
$$20 \quad 0,01 \leq x \leq 0,25$$

$$0,40 \leq y \leq 0,55$$

$$0,20 \leq z \leq 0,59$$

$$x + y + z = 1.$$

25 7. Elektromechanischer Wandler nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Mischkristallkeramik folgende Zusammensetzung aufweist:



30

35

## Elektromechanischer Wandler

Die Erfindung bezieht sich auf einen elektromechanischen Wandler mit  $2n$ , aus einem piezoelektrischen oder elektrostriktiven Material bestehenden, einen Stapel bildenden, streifenförmigen, an ihren Hauptflächen mit Elektroden  
5 bedeckten Schichten, von denen jeweils  $n$  eine Stapelhälfte bildende Schichten beiderseits der Mitte des Stapels liegen, und mit Einrichtungen zum Zuführen von Spannungen an die Elektroden zur Bildung von senkrecht zu den Hauptflächen der Schichten stehenden elektrischen Feldern.

10

Wandler dieser Art können angewendet werden, z.B. bei der Erzeugung, Messung und Ermittlung von Schall, Stoß, Vibration, Druck usw. Es werden dabei elektrische Impulse in eine mechanische Auslenkung umgesetzt oder umgekehrt.

15

Es sind elektromechanische Wandler aus piezoelektrischem oder elektrostriktivem Material bekannt (z.B. DE-OS 29 18 625 oder US-PS 24 84 950), die aus zwei aufeinandergeklebten Keramikstreifen bestehen. Solche Wandler in  
20 Bimorph-Konfiguration werden üblicherweise an einem Ende eingespannt und werden durch Anlegen geeigneter Spannungen an ihrem freien Ende ausgelenkt und können so beispielsweise als Stellglied zum Nachsteuern von Videoköpfen bei magnetischer Videoaufzeichnung dienen.

25

Die Auslenkung  $z$  solcher Wandler ist gegeben durch

$$z = A \cdot d_{31} \cdot \frac{l^2}{h^2} \cdot U; \text{ in der Formel bedeuten:}$$

30  $A$  = Faktor von ca. 3;  $d_{31}$  = piezoelektrische Ladungskonstante;  $l$  = freie Länge des Wandlerkörpers;  
 $h$  = Gesamtdicke des Wandlerkörpers und  $U$  = die am Wandler

anliegende Spannung. Ein derartiger Wandler gemäß dem Stand der Technik ist in Fig. 1 dargestellt.

Ein Problem solcher Wandler ist, daß zum Erzielen geeigneter Auslenkungen im allgemeinen Spannungen im Bereich von 100 V benötigt werden. Eine Verringerung der Schichtdicken  $d$  der am Aufbau des Wandlerkörpers beteiligten einzelnen Schichten bzw. der Gesamtdicke  $h$  des Wandlerkörpers vergrößert zwar die Empfindlichkeit des Wandlers, d.h. mit kleineren Spannungen sind gleich große oder größere Auslenkungen erreichbar, da aber die an der freien Spitze des Wandlerkörpers wirksame Kraft  $F$

durch  $F = B \cdot S_{11}^{-1} \frac{h^3}{l^3} \cdot z$  gegeben ist, worin bedeuten:  $B$  = Proportionalitätsfaktor, in dem u.a. die Breite des Wandlerkörpers enthalten ist;  $S_{11}$  = eine der Elastizitätskonstanten des verwendeten Materials;  $h$  = Gesamtdicke des Wandlerkörpers;  $l$  = freie Länge des Wandlerkörpers und  $z$  = Empfindlichkeit des Wandlerkörpers, nimmt die ausnutzbare Kraft schneller ab als die Empfindlichkeit des Wandlers ( $z/U$ ) verbessert wird.

Eine Lösung dieses Problems wäre, daß die elektrisch wirksame Dicke  $d$  des Wandlerkörpers reduziert wird, ohne die mechanisch wirksame Dicke  $h$  des Wandlerkörpers zu verändern. Dazu müßten statt zwei Keramikstreifen  $2n$

Keramikstreifen übereinandergelegt und in geeigneter Weise kontaktiert werden. Ein Wandlerkörper in einer derartigen Multimorph-Konfiguration ist in Fig. 2 dargestellt. Ein solcher Multimorph-Wandler hätte den Vorteil, daß im Vergleich zu einem Wandler in Bimorph-Konfiguration gleicher Gesamtdicke wesentlich geringere elektrische Spannungen nötig sind, um die gleiche Auslenkung zu erzielen, die wirksamen mechanischen Stell-

kräfte jedoch gleich sind. Es darf jedoch nicht erwartet werden, daß die Empfindlichkeit  $z/U$  des Wandlers bei einer Anordnung mit  $2n$  Schichten um einen Faktor  $n$  zunimmt. Dies liegt an der internen mechanischen Spannungsverteilung bei der Biegung eines solchen Wandlers; das Dehnungs-Schrumpfungs-Verhalten eines Bimorph-Wandlers ist in Fig. 3 dargestellt. Die Fig. 3 zeigt schematisch einen gebogenen Wandlerkörper in Bimorph-Konfiguration mit eingezeichneter neutraler Faser; die sich bei der Krümmung ergebende mechanische Dehnung in Abhängigkeit vom Abstand von der neutralen Faser ist mit den Pfeilen  $a$  eingezeichnet. An der Oberseite ist maximale Dehnung feststellbar, während an der Unterseite maximale Schrumpfung stattfindet. Ein Wandler in Multimorph-Konfiguration mit konstanter Dicke der einzelnen Schichten gibt bei elektrischer Ansteuerung mit gleicher Spannung pro Schicht gemäß Fig. 4 eine konstante Dehnung (vgl. Pfeile  $a$ ) vor, die nicht dem natürlichen Dehnungsverlauf bei Biegung entspricht. Daher müssen starke innere Scherspannungen auftreten, die zu Delamination der einzelnen Schichten führen können. Durch diese gegenseitige Hemmung der einzelnen Schichten ist die Empfindlichkeitszunahme kleiner als durch den Faktor  $n$  gegeben.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen elektromechanischen Wandler in Multimorph-Konfiguration zu schaffen, bei dem die unerwünschten Auswirkungen der inneren mechanischen Scherspannungen zwischen den einzelnen Schichten des Wandlerkörpers auf ein Mindestmaß reduziert sind.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Dicke der Schichten jeder Stapelhälfte von der Mitte des Stapels her nach außen hin abnimmt und daß die Schichten beider Stapelhälften, die in gleichem Abstand zur Mitte des Stapels liegen, gleiche Dicke aufweisen.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß die Auswirkung der inneren Scherspannungen zwischen den einzelnen, den Wandlerkörper eines Wandlers in Multimorph-Konfiguration bildenden Schichten dadurch minimiert werden können, daß die Schichtdicke der einzelnen Schichten des Wandlerkörpers nicht konstant gehalten wird, sondern so angepaßt wird, daß die mittlere Dehnung pro Schicht gerade der natürlichen Dehnung bei Biegung entspricht. Hierzu wird auf Fig. 5 hingewiesen, in der mit den Pfeilen a dargestellt ist, wie die mittlere Dehnung pro Schicht gerade der natürlichen Dehnung bei Biegung entspricht.

Nach einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist die Schichtdicke der n-ten Schicht  $d_n$ , ausgehend von der neutralen Faser, die sich immer automatisch einstellt und geometrisch in der Mitte zwischen dem Bereich der maximalen Dehnung und der maximalen Schrumpfung liegt, gegeben durch:

$$d_n = (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \cdot d_1, \text{ wobei } n \text{ den Laufindex der}$$

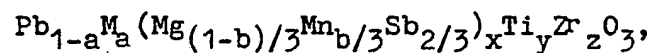
Schichten, also die n-te Schicht, bezeichnet, und  $d_1$  die Schichtdicke der dicksten Schicht bedeutet.

Bei Wahl der Schichtdicken gemäß dieser Beziehung ergibt sich vorteilhaft, daß die Empfindlichkeit  $z/U$  gegenüber einem Biegeelement mit gleicher Gesamtdicke  $n$  und gleicher Länge  $l$ , jedoch gleichmäßiger Schichtdicke um den Faktor  $n$  erhöht wird; dabei ist das Auftreten von Scherspannungen zwischen den einzelnen Schichten minimiert.

Nach weiteren vorteilhaften Ausgestaltungen der Erfindung ist der aus den streifenförmigen Schichten gebildete Stapel an seinem einen Ende in einer Halterung fixiert, wobei die freie Länge des Stapels senkrecht zu seinen

Hauptflächen auslenkbar ist; das Verhältnis von freier Länge zu Gesamtdicke des Stapels beträgt vorteilhafterweise 5 : 1 bis 100 : 1.

- 5 Nach weiteren Ausgestaltungen der Erfindung bestehen die streifenförmigen Schichten aus einem Material, dessen Wert für die piezoelektrische Ladungskonstante  $d_{31}$  mindestens  $150 \cdot 10^{-12}$  m/V beträgt; insbesondere bestehen die streifenförmigen Schichten aus einer ferroelektrischen
- 10 Mischkristallkeramik auf der Basis von



worin bedeuten:

15

M = mindestens ein Erdalkalimetall wie Ca, Sr, Ba

$$0 \leq a \leq 0,15$$

$$0 \leq b \leq 0,20$$

$$0,01 \leq x \leq 0,25$$

20  $0,40 \leq y \leq 0,55$

$$0,20 \leq z \leq 0,59$$

$$x + y + z = 1$$

- 25 Die mit der Erfindung erzielten Vorteile bestehen insbesondere darin, daß durch Anpassung der Schichtdicken der einzelnen Schichten eines elektromechanischen Wandlers in Multimorph-Konfiguration an den internen mechanischen Spannungsverlauf verbesserte Emp-
- 30 findlichkeitswerte erzielbar sind.



Anhand der Zeichnung wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben und in ihrer Wirkungsweise dargestellt. Es zeigen:

- 5 Fig. 1 elektromechanischer Wandler in Bimorph-Konfiguration nach dem Stand der Technik,
- Fig. 2 elektromechanischer Wandler in Multimorph-Konfiguration nach dem Stand der Technik,
- Fig. 3 elektromechanischer Wandler in Bimorph-Konfiguration nach dem Stand der Technik in gebogenem
- 10 Zustand,
- Fig. 4 Dehnungsverhalten eines Wandlers in Multimorph-Konfiguration gemäß dem Stand der Technik bei Ansteuerung mit gleicher Spannung pro Schicht,
- 15 Fig. 5 Darstellung der mittleren Dehnung pro Schicht im Verhältnis zur natürlichen Dehnung bei Biegung bei einem Wandlerkörper in Multimorph-Konfiguration gemäß der Erfindung,
- Fig. 6 einen elektromechanischen Wandler in Multimorph-Konfiguration gemäß der Erfindung,
- 20 Fig. 7 Empfindlichkeit eines Wandlers in Multimorph-Konfiguration gemäß der Erfindung im Vergleich zu der eines Wandlers in Bimorph-Konfiguration gemäß dem Stand der Technik, aufgetragen über
- 25 der angelegten elektrischen Spannung  $U/V$ .

In Fig. 6 ist ein Ausführungsbeispiel eines Wandlers mit einem aus streifenförmigen Schichten 1, 1', 2, 2', 3 und 3' aufgebauten Wandlerkörper 5 mit einer Verdrahtung der

30 einzelnen Schichten dargestellt. Die Pfeile 7 in den Schichten 1, 1' bis 3, 3' heben die Polarisationsrichtungen an. Die beiden Stapelhälften des Wandlerkörpers gemäß den Schichten 1, 2, 3 und 1', 2', 3' liegen in Parallelschaltung an einer nicht dargestellten Spannungsquelle.

Dieser Schaltung entsprechend verläuft die elektrische Feldstärke in den Schichten 1', 2', 3' z.B. in Richtung der Polarisation der einzelnen Schichten und in den Schichten 1, 2, 3 entgegengesetzt der Richtung der Polarisation in den einzelnen Schichten. Der Pfeil 11 gibt die Richtung der Feldstärke an; dementsprechend ergibt sich für die einzelnen Schichten 1, 1' bis 3, 3' eine Richtung der Feldstärke gemäß den Pfeilen 8.

- 10 Mit 9 ist eine Halterung zum einseitigen Fixieren des aus den Schichten 1, 1' bis 3, 3' gebildeten Wandlerkörpers 5 dargestellt. Die freie Länge des Wandlerkörpers beträgt 12 mm, die Schichtdicken der einzelnen Schichten sind in der Figur angegeben, sie betragen 320  $\mu\text{m}$  (Schichten 1, 1'), 130  $\mu\text{m}$  (Schichten 2, 2') und 100  $\mu\text{m}$  (Schichten 3, 3').

Wenn die zur Berechnung der einzelnen Schichtdicken oben angegebene Formel  $d_n = (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \cdot d_1$  angewendet wird, ergeben sich als exakte Werte für die Schichten geringe Abweichungen; wenn die Schichten größter Dicke 1, 1' mit 320  $\mu\text{m}$  angenommen werden, ergäben sich als exakte Werte für die Schichten 2, 2' = 131,2  $\mu\text{m}$  und für die Schichten 3, 3' = 102,4  $\mu\text{m}$ . In dem hier beschriebenen Ausführungsbeispiel wurden diese Werte aus fertigungstechnischen Gründen auf 130  $\mu\text{m}$  respektive 100  $\mu\text{m}$  abgerundet.

In Fig. 6 sind die einzelnen Schichten 1, 1' bis 3, 3' mit unterschiedlicher Länge dargestellt. Dies ist erforderlich, um freien Platz für die Elektrodenanschlüsse zu erhalten; das freie, nicht in der Halterung 9 fixierte Ende des Wandlerkörpers 5 hat zweckmäßigerweise bündige Schichten 1, 1' bis 3, 3'.

In Abhängigkeit von der angelegten Spannung wurde die Empfindlichkeit am Ende des Elementes gemessen und gemäß der

Formel  $z = A \cdot d_{31} \cdot \frac{l^2}{h^2} \cdot U$  mit  $h^2/l^2$  multipliziert,

5

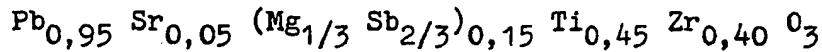
um eine von der Geometrie unabhängige Vergleichsgröße zu erhalten. Die gleichen Messungen wurden mit einem Bimorph-Wandler nach dem Stand der Technik gemacht und es wurde ebenfalls die Empfindlichkeit  $z \cdot h^2/l^2$  über  
10 der angelegten Spannung bestimmt. Die geometrieunabhängige Empfindlichkeit  $z$  des Wandlers ist über der angelegten Spannung in Fig. 7 dargestellt. In der Formel bedeuten  $z$  = Empfindlichkeit des Wandlerkörpers;  
 $h$  = Gesamtdicke des Wandlerkörpers;  $l$  = freie Länge des  
15 Wandlerkörpers und  $U$  = angelegte Spannung.

Es ergibt sich, daß die Vielschichtanordnung mit angepaßter Dicke der streifenförmigen Schichten des Wandlerkörpers tatsächlich Auslenkungswerte zeigt, die nahe der  
20 theoretisch zu erwartenden Kurve liegen, die bei  $2 \times 3$  Schichten um einen Faktor 3 größer sein soll als für einen Wandler in Bimorph-Konfiguration. Daß die gemessenen Werte sogar höher liegen als erwartet, kann an dem stärkeren nichtlinearen Verhalten des Multimorph-Wandlers  
25 liegen, da die Feldstärkenwerte innerhalb der äußeren Schichten bei gleicher Spannung deutlich größer waren als bei dem Bimorph-Wandler.

Der Wandlerkörper 5 mit den Schichten 1, 1' bis 3, 3' soll aus einem ferroelektrischen keramischen Material  
30 bestehen, dessen Wert für die piezoelektrische Ladungskonstante  $d_{31}$  mindestens  $150 \cdot 10^{-12}$  m/V beträgt. Derartige keramische Materialien sind käuflich erhältlich und z.B. in der EP-OS 00 19 337 ausführlich beschrieben.

35

Für das hier beschriebene Ausführungsbeispiel wurde eine keramische Masse der Formel



5

verwendet, wobei der Wandlerkörper mit den Schichten 1, 1' bis 3, 3' auf folgende Weise hergestellt wurde:

Das keramische Ausgangsmaterial wurde trocken ohne Zusatz von Bindemitteln verpreßt und bei einer Temperatur von  
10 850°C in Sauerstoff 2 h vorgesintert. Anschließend wurde ein Scharfbrand bei einer Temperatur von ca. 1200°C mit einer Dauer in der Größenordnung von ca. 45 min ausgeführt. Aus den Sinterkörpern wurden anschließend mittels mechanischer Bearbeitung (z.B. Sägen, Polieren) Körper  
15 mit den Abmessungen von 22 mm Länge x 7 mm Breite x 320 bis 100 µm Dicke hergestellt. Auf den Hauptflächen der so vorbereiteten Körper wurden Elektroden, hier beispielsweise aus Gold, durch Aufdampfen angebracht. Die Elektroden, die vorzugsweise einen ohmschen Kontakt bilden müssen, können jedoch aus beliebigen, für Elektroden geeigneten Metallen oder Legierungen, wie Silber, Nickel oder Nickel-Chrom-Legierungen, bestehen. Die Elektroden-  
20 schichten können z.B. auch durch Aufspritzen oder Siebdrucken einer Paste mit anschließender Wärmebehandlung oder durch stromolose Abscheidung aus einem Metallbad  
25 auf gleiche Weise erhalten werden.

Um einen Wandlerkörper mit den Schichten 1, 1' bis 3, 3' zu erhalten, wurden jeweils 6 der oben beschriebenen  
30 Sinterkörper, nämlich jeweils Sinterkörper der Abmessungen 22 mm x 7 mm x 320 µm, 22 mm x 7 mm x 130 µm und 22 mm x 7 mm x 100 µm mittels einer Kunstharzkleberschicht derart fest miteinander verbunden, daß die Sinterkörper größter Dicke benachbart in der Mitte des  
35 Stapels, die Sinterkörper kleinster Dicke jeweils an den

Außenseiten des Stapels liegen. Die kraftschlüssige Verbindung der die Schichten 1, 1' bis 3, 3' des Wandlerkörpers 5 bildenden Sinterkörper kann im Rahmen des fachmännischen Handels jedoch auf beliebige andere Weise erfolgen. Die Elektroden-schichten wurden durch mittels Thermokompression befestigte Golddrähte elektrisch miteinander verbunden.

Die Polarisierung der Schichten 1, 1' bis 3, 3' erfolgte jeweils vor dem Zusammenkleben der Schichten entsprechend der gewünschten Polarisationsrichtung mit einer Feldstärke von 2,5 MV/m 10 min bei einer Temperatur von 120°C.

Die Gesamtdicke des Wandlerkörpers 5 betrug bei diesem Ausführungsbeispiel 1,2 mm, davon sind ca. 100 µm Klebefugen. Die freie Länge des Wandlerkörpers betrug 12 mm, die Breite 7 mm.

Für die Herstellung des keramischen Wandlerkörpers gemäß der Erfindung sind außer der genannten ferroelektrischen keramischen Masse alle ferroelektrischen keramischen Massen mit einer piezoelektrischen Ladungskonstanten  $d_{31}$  von  $> 150 \cdot 10^{-12}$  m/V ebenso geeignet.

Nummer: 3142684  
 Int. Cl.<sup>3</sup>: H01L 41/08  
 Anmeldetag: 28. Oktober 1981  
 Offenlegungstag: 5. Mai 1983

10-81

- 19 -

3142684

1/7

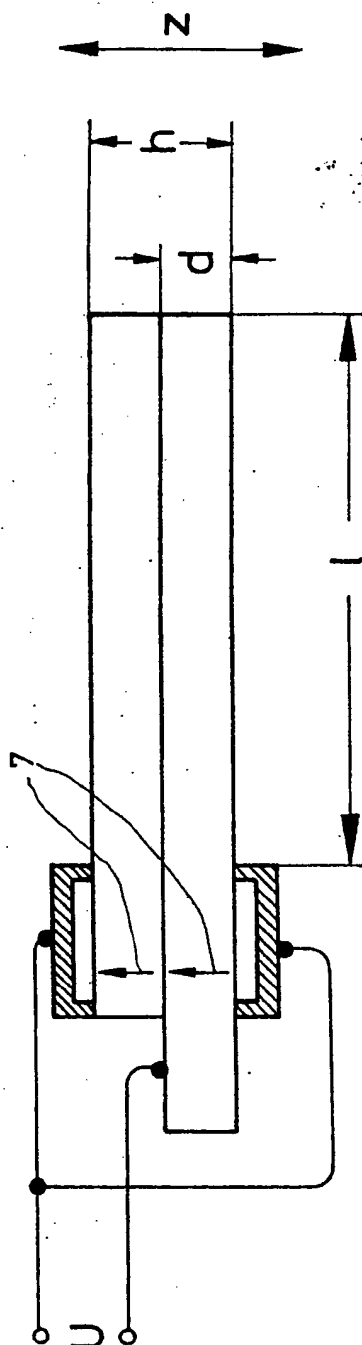


Fig. 1

3142684

3142684

13

217

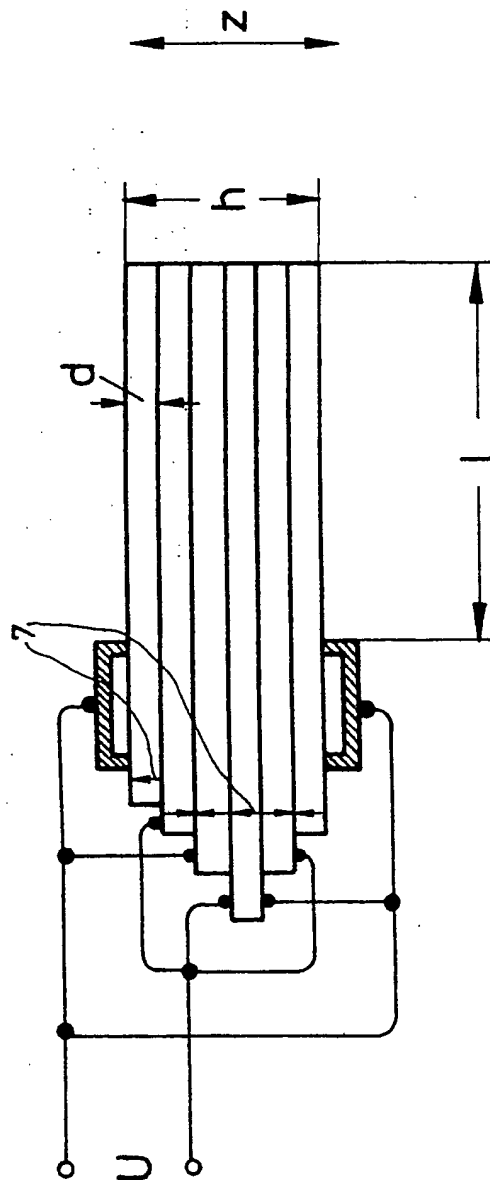


Fig. 2

20.10.81

3142684

-14-

3/7

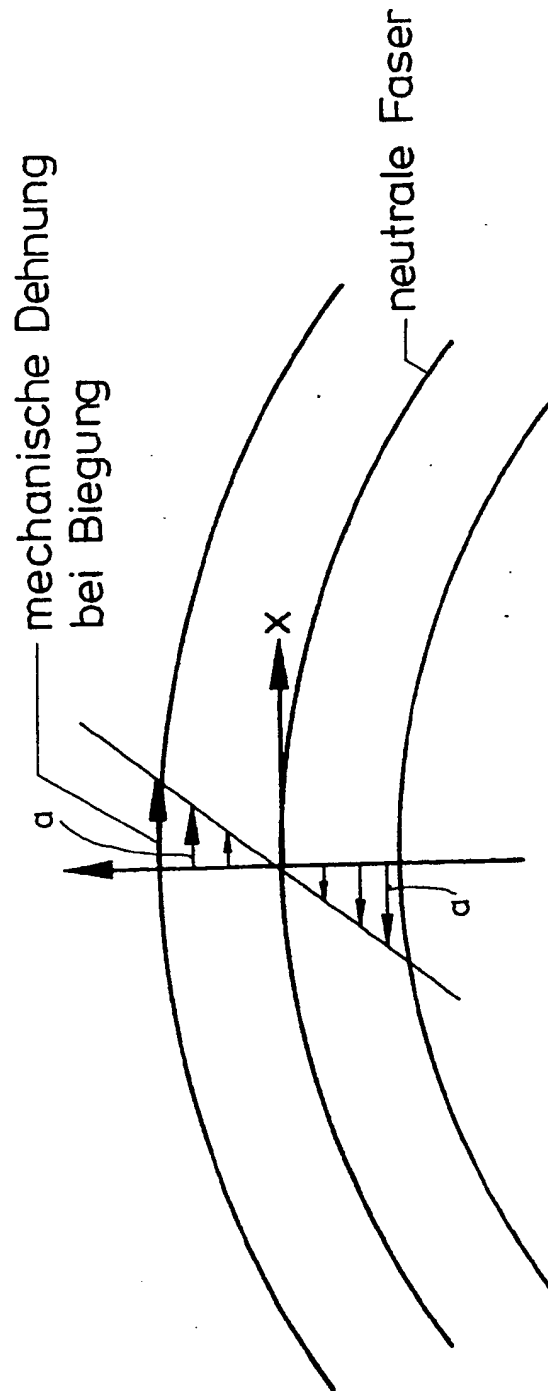


Fig. 3

D 81-118



20-10-81

3142684

15

4/7

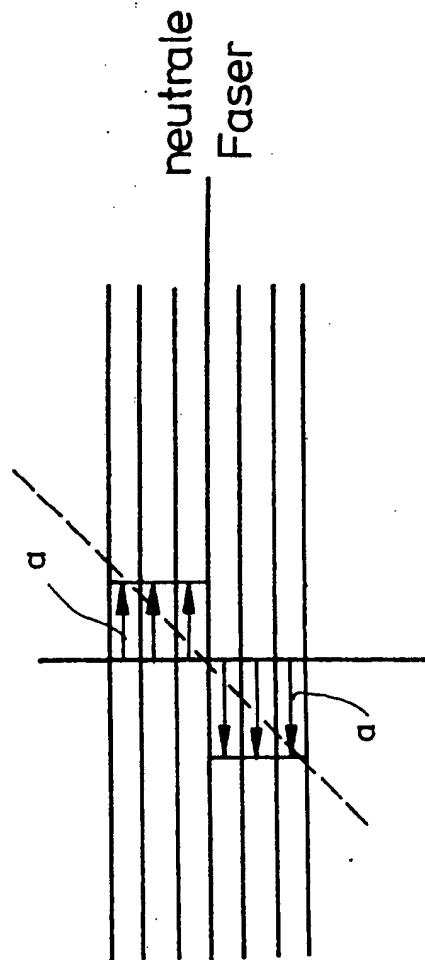


Fig. 4

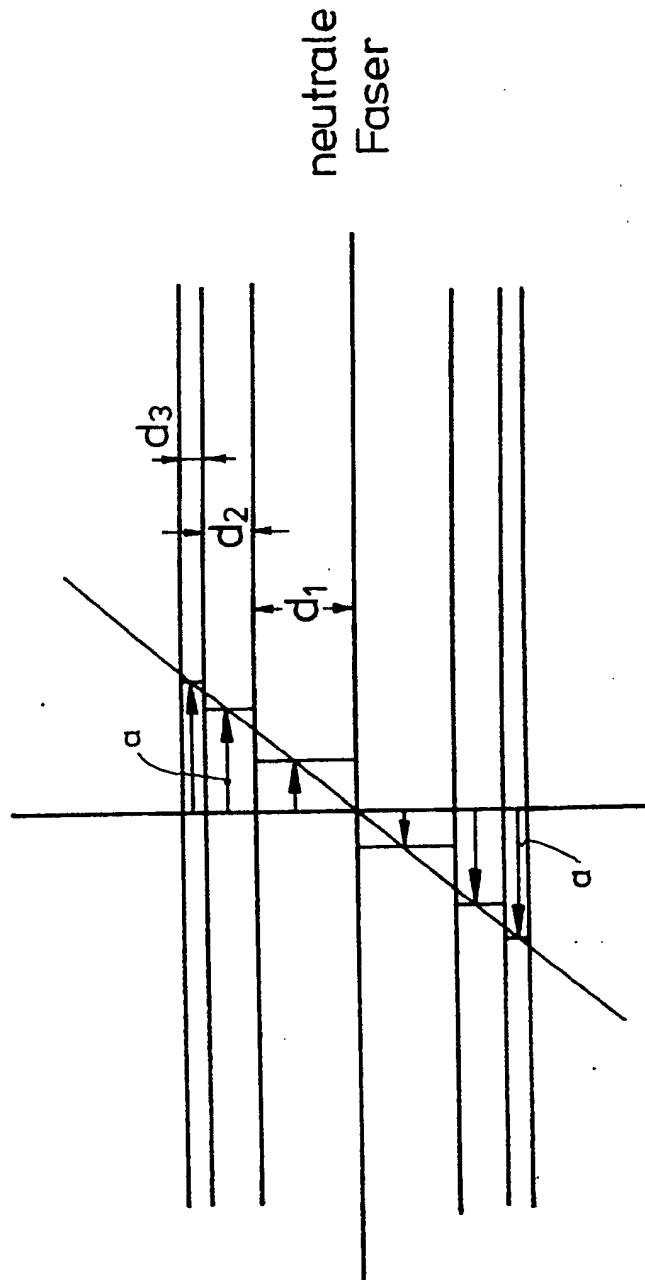


Fig. 5

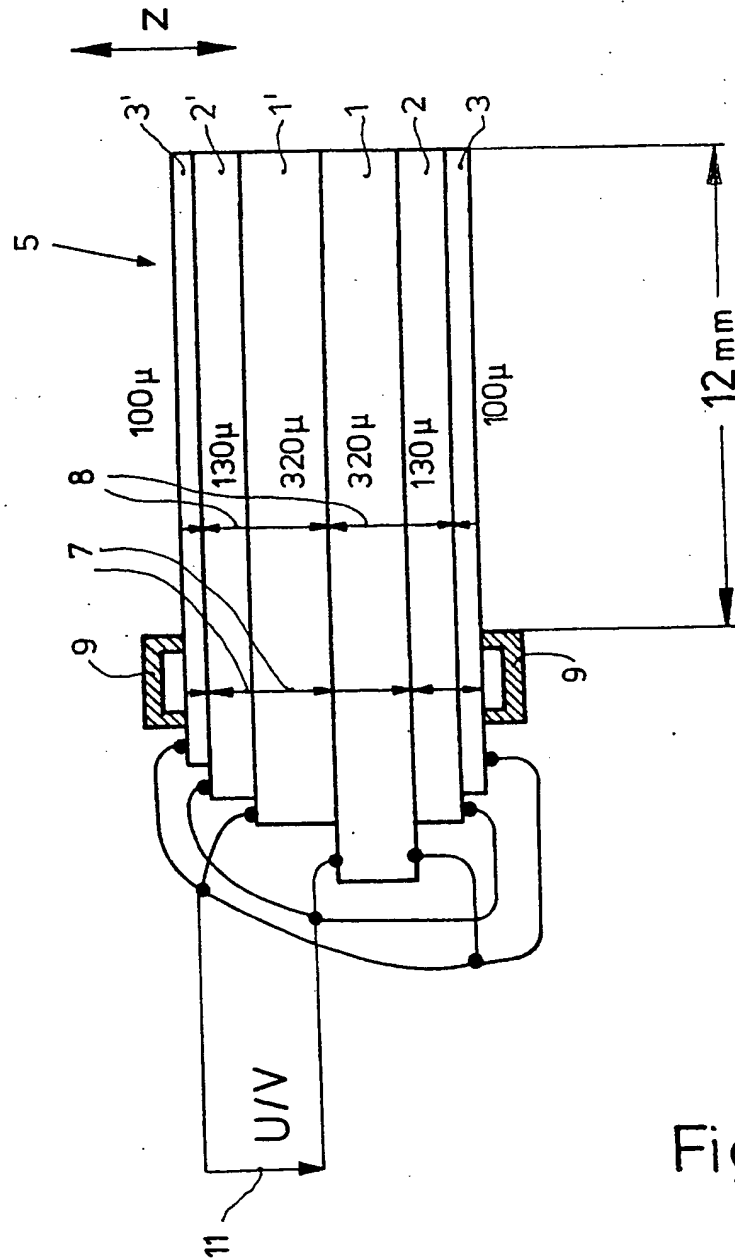


Fig. 6

Fig. 7

